

ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВИЙ АНАЛІЗ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З РІЗНИМИ АКСІАЛЬНИМИ ДОВЖИНАМИ МАГНІТОПРОВОДУ

В. І. Міліх, д.т.н., проф., А. М. Ольховський, магістр., Н. В. Полякова, асист.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе, 21, 61002, м. Харків, Україна, e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Вступ. До найбільш ефективних для розрахунку електромагнітних полів в пристроях з феромагнітними осердями відноситься метод скінчених елементів, особливо з появою автоматизованих програмних комплексів, таких як програма FEMM [1], що дозволяє розраховувати плоскопаралельні поля у двохвимірних областях.

У такому контексті обширна теорія електричних машин (ЕМ) з безліччю розрахункових виразів, створених для цілої низки параметрів окремих їхніх типів, зводиться у багатьох випадках до декількох базових універсальних виразів. Вони дозволяють отримувати електромагнітні параметри машин, незалежно від їхнього типу і конструкції за результатами розрахунку магнітного поля. Завдання розрахувача полягає у кваліфікованій підготовці вихідних даних і геометрії ЕМ і подальшому усвідомленому використанні набутих результатів.

Мета роботи. Представлення принципів підходів до чисельних розрахунків магнітних полів в електричних машинах складної конструкції з магнітопроводом, що має ділянки з різною аксіальною довжиною.

Матеріали та результати досліджень. Об'єктом дослідження є двигун постійного струму (ДПС) потужністю 400 кВт, електромагнітна система якого дана на рис.1. Основні параметри двигуна: діаметр якоря – 493 мм; немагнітний проміжок – 4 мм; активна довжина якоря $l_a=360$ мм; номінальний струм обмотки збудження $I_{EN}=14,45$ А, її кількість витків на полюс – 476; номінальний струм обмотки якоря $I_{aN}=1310$ А, кількість її ефективних провідників – $z_a=276$, кількість ефективних провідників в пазу $z_{Qwa}=6$; кількість стрижнів компенсаційної обмотки на полюс – $N_{cmp}=12$, кількість ефективних стрижнів в одному пазу $z_{Qcm}=2$; кількість витків обмотки додаткових полюсів на полюс $N_{ad}=5$.

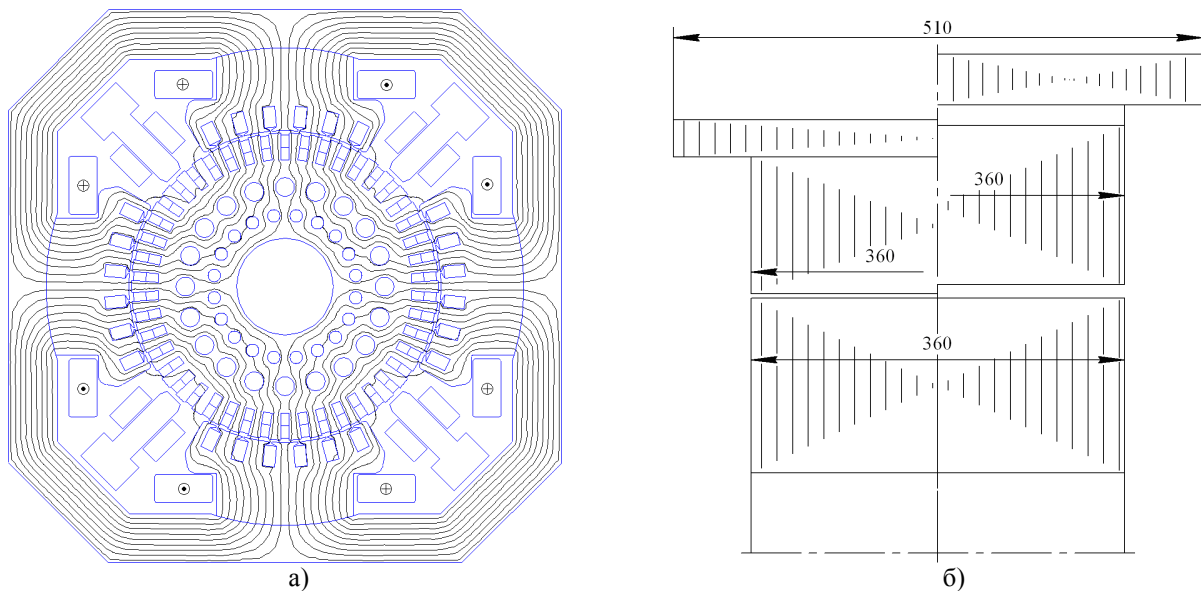


Рисунок 1 – Електромагнітна система ДПС:

- а) поперечний переріз з картиною магнітного поля у режимі неробочого ходу при номінальному збудженні;
б) повздовжній переріз: ліворуч – за віссю головного полюсу, праворуч – за віссю додаткового полюсу

Структура магнітопроводу ДПС за аксіальною координатою подана на рис.1, б і в табл.1 позначені: k – номер ділянки відповідно до рис.1; l_{Fe} – довжина активної частини осердя; K_{Fe} – коефіцієнт заповнення сталлю.

Магнітне поле у поперечному перерізі ЕМ подається диференціальним рівнянням

$$\operatorname{rot} \left[\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (1)$$

де A_z , J_z – аксіальні складові векторного магнітного потенціалу (ВМП) і густини струму; μ – абсолютна магнітна проникність; \vec{k} – орт.

Магнітний потік, що входить в якір:

$$\Phi_a = (A_{z1} - A_{z2}) l_a, \quad (2)$$

де A_{z1} , A_{z2} – значення ВМП у точках 1 і 2 в площині розрахунку у проміжку на осях додаткових полюсів, через які проходять бічні сторони контуру з уявною площею поверхні на полюсному кроці.

Принциповий підхід до врахування різних аксіальних довжин частин магнітопроводу ЕМ був представлений у [2, 3]. Ідея полягала в тому, що магнітне поле вважається плоскопаралельним лише в межах зон, на які ділить-

Таблиця 1 – Параметри ділянок магнітопроводу

k	Назва ділянки	l_{Fe} , мм	K_{Fe}	Марка сталі	$K_{l,k}$
1	Осердя якоря	360	0,93	2312	1
2	Осердя головного полюса	360	0,95	3411	1
3	Осердя додаткового полюса	360	0,98	3411	1
4	Станина	510	0,95	2312	1,417

ся область розрахунку у поперечному перерізі ЕМ. Стиковка полів окремих зон робиться за умови неперервності магнітного потоку з урахуванням конкретних аксіальних довжин елементів, що входять в ці зони. В якості зон можуть бути взяті ділянки магнітопроводу, а також частини немагнітних проміжків між ними.

Практична реалізація удосконалень, запропонованих в [2, 3], виразилась у використанні так званих коефіцієнтів зведення різномірних аксіальних довжин до єдиної аксіальної довжини ЕМ. Це супроводжувалось відповідним перерахунком магнітних властивостей і магнітних величин в обмежених зонах області розрахунку.

Для того, щоб при розрахунку магнітного поля у поперечному перерізі ЕМ врахувати різні аксіальні довжини її частин, необхідно скорегувати магнітні властивості, що задаються для локальних зон цього перерізу.

Область розрахунку (рис. 1) ділиться на зони, в якості яких візьмемо ділянки магнітопроводу, що представлені на рис.1 і в табл. 1. Тут, у першому наближенні, в якості окремої єдиної зони приймається немагнітний простір, що залишився. Для більш детальних розрахунків останній можна поділити на локальні зони з виділенням проміжків між полюсами і якорем, а також дробленням міжполюсного простору, як це робилось в [2].

Для всієї ЕМ приймається деяка базова довжина l_B , а для кожної зони приймається певна аксіальна довжина l_k (тут і далі індекс k означає номер зони) і визначається коефіцієнт зведення

$$K_{l,k} = \frac{l_k}{l_B}. \quad (3)$$

В якості базової довжини може бути прийнята аксіальна довжина однієї із ділянок магнітопроводу, хоча і довільний вибір l_B не впливає на кінцеві результати. Значення коефіцієнту зведення надані в табл. 1.

В зонах з лінійними магнітними властивостями, що характеризуються вихідним значенням абсолютної магнітної проникливості μ_k , необхідно задавати її зведені значення

$$\mu_{\zeta,k} = \mu_k K_{l,k}. \quad (4)$$

Для феромагнітних осердь, що характеризуються певною кривою намагнічування $B(H)$, необхідно шкалу магнітної індукції B змінити для кожної виділеної зони таким чином:

$$mB_{\zeta} = mB \cdot K_{l,k}, \quad (5)$$

де mB , mB_{ζ} – масштаби по шкалі індукції вихідної і зведеної кривих намагнічування. Шкала напруженості магнітного поля H зберігається.

Із створеними таким чином магнітними властивостями матеріалів проводиться розрахунок магнітного поля по програмі FEMM. Після розрахунку на ділянках магнітопроводу необхідно перерахувати магнітну індукцію B_F , яка отримана з програми FEMM, або її складові так:

$$B = \frac{B_F}{K_{l,k}}, \quad (6)$$

що здійснює повертання від еквівалентної розрахункової моделі ДПС до реальної з конкретними осьовими довжинами ділянок магнітопроводу.

Відповідно повинна бути перерахована решта величин, які використовують магнітну індукцію.

Демонстрація ефективності запропонованого методу здійснюється за допомогою магнітної характеристики $\Phi_a(I_E)$ – залежності магнітного потоку Φ_a (2), який входить в якорь ДПС, від струму обмотки збудження I_E . При цьому, у даному конкретному прикладі, в обмотках ярірного кола струму немає.

На рис. 2 подано два варіанти характеристики: 1 – за програмою FEMM без удосконалень; 2 – з поданим удосконаленням. Очевидна різниця між ними, і, отже, ефективність запропонованої методики розрахунку магнітного поля в умовах ДПС з різномірною аксіальною структурою.

Висновки. Базова програма FEMM при розрахунку магнітного поля в поперечному перерізі ЕМ не дозволяє враховувати різномірні аксіальні довжини ділянок магнітопроводу. Це може приводити до похибок, які суттєво перевищують навіть похибки розрахунку магнітного поля ЕМ традиційним методом неоднорідного магнітного кола. Запропоноване удосконалення у компоновці з програмою FEMM дає можливість отримання результатів, адекватних реальним конструкціям ЕМ з неоднорідною торцевою структурою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>, 2005.
2. Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника. – 1982. – № 12. – С. 46–49.
3. Милых В.И., Поляков И.В., Полякова Н.В., Штангеев Е.И. Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем её использования для расчета магнитного поля электрических машин // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – №3. – С. 38–43.

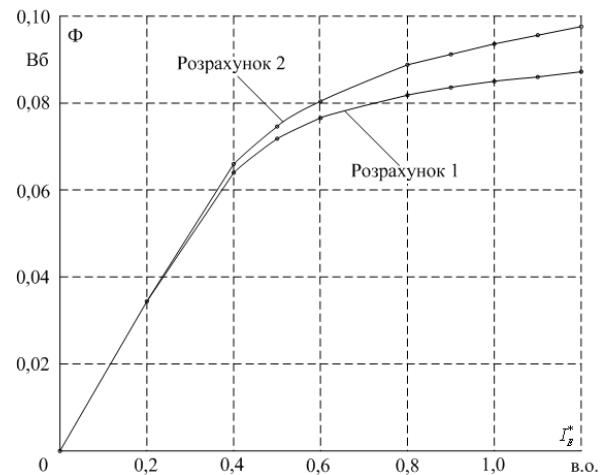


Рисунок 2 – Магнітні характеристики ДПС